

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky

Experimentální elektrostatický mikrofon

David Chochlovský

Vedoucí práce: Ing. Petr Honzík, Ph.D.
Studijní program: Elektronika a komunikace
Květen 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Chochlovský** Jméno: **David** Osobní číslo: **503510**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Experimentální elektrostatický mikrofon

Název bakalářské práce anglicky:

Experimental Electrostatic Microphone

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s principy funkce kondenzátorových mikrofonů, tj. s teoretickými základy funkce elektrostatického měniče a související elektronikou. Navrhněte snadno realizovatelný kondenzátorový mikrofon za pomoci návrhu PCB (pevná elektroda a související elektronika) a 3D tisku. Realizujte funkční vzorek navrženého mikrofonu, proveďte měření jeho parametrů (citlivost, frekvenční charakteristika) a porovnejte s teoretickými hodnotami. Navrhněte optimalizaci parametrů mikrofonu, zejména s ohledem na rozměry pevné elektrody, využijte modely dostupné v literatuře. Vyhodnoťte úspěšnost optimalizace.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Z. Škvor.: Elektroakustika a akustika, ČVUT, Praha (2012).
[2] P. Honzík, A. Podkovskiy, S. Durand, N. Joly, M. Bruneau: Analytical and numerical modeling of an axisymmetrical electrostatic transducer with interior geometrical discontinuity, J. Acoust. Soc. Am. 134 (2013), 3573-3579.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Honzík, Ph.D. katedra radioelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **09.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Petr Honzík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu práce panu Ing. Petru Honzíkovi, Ph.D. za veškerou pomoc a čas, který mi věnoval v rámci tohoto projektu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 24. května 2024

Abstrakt

Práce se zabývá teorií a realizací elektrostatického mikrofону. Nejprve byl sestaven zjednodušený analytický model za pomoci náhradních obvodů. Ten slouží k porovnání s naměřených výstupních charakteristik prototypu měniče. Dále byl použit pokročilý analytický model převzatý z literatury, který slouží k optimalizaci a následný návrh elektrostatického mikrofónu s pevnou elektrodou menší, než je pohyblivá elektroda mikrofónu - membrána. Nově navržený měnič byl realizován a proměřen.

Klíčová slova: elektrostatický mikrofón, náhradní obvod, simulace, frekvenční charakteristika, DPS, 3D tisk, zvuková vlna

Vedoucí práce: Ing. Petr Honzík, Ph.D.

Abstract

The thesis deals with the theory and implementation of an electrostatic microphone. First, a simplified analytical model was created using equivalent circuits. This serves to compare with the measured output characteristics of the transducer prototype. Furthermore, an advanced analytical model from the literature was used, which serves for the optimization and subsequent design of an electrostatic microphone with a fixed electrode smaller than the moving electrode of the microphone - the diaphragm. The newly designed transducer was realized and measured.

Keywords: electrostatic microphone, equivalent circuit, simulation, frequency response, PCB, 3D printing, sound wave

Title translation: Experimental electrostatic microphone

Obsah

Úvod	1		
1 Teoretická část	3		
1.1 Elektrostatický mikrofón	3		
1.2 Citlivost mikrofónu	4		
1.3 Výchylka kruhové membrány	5		
1.4 Průměrná výchylka kruhové membrány	5		
1.5 Náhradní obvod mikrofónu	6		
1.5.1 Mechanická impedance kruhové membrány	7		
1.5.2 Mechanická impedance prostoru mezi elektrodami	8		
1.5.3 Mechanická impedance děr v pevné elektrodě	9		
1.5.4 Mechanická impedance zadní dutiny mikrofónu	10		
1.5.5 Kvazistatická stabilita elektrostatického měniče	10		
1.6 Pevná elektroda menší než membrána	11		
2 Výsledky modelu mikrofónu	13		
2.1 Vliv parametrů náhradního obvodu na citlivosti mikrofónu	14		
2.2 Model pro pevnou elektrodu menší než je membrána	16		
3 Praktická část	19		
3.1 Komponenty mikrofónu	19		
3.2 Měření prototypu	20		
3.2.1 Měření mikrofónu ve vzduchu s referenčním mikrofónem	20		
3.2.2 Měření mikrofónu ve vzduchu pomocí elektrostatické budící mřížky	21		
3.2.3 Měření mikrofónu ve vakuu	22		
3.2.4 Porovnání měření a výsledků modelů	23		
3.2.5 Výpočet mechanického napětí membrány	25		
3.3 Návrh mikrofónu s menší pevnou elektrodou než je membrána	26		
3.3.1 Návrh parametrů elektrody	26		
3.3.2 Návrh DPS	27		
3.3.3 Regulátor napětí MIC5231-5.0YM5-TR	27		
3.3.4 Invertor napětí LM2776DBVT	27		
3.3.5 Audio operační zesilovač OPA1655DBVR	27		
3.4 Měření mikrofónu s menší pevnou elektrodou než je membrána	29		
3.4.1 Měření menší elektrody ve vzduchu s referenčním mikrofónem	29		
3.4.2 Porovnání se simulací	29		
3.4.3 Problémy při měření	29		
Závěr	33		
Literatura	35		
A Schéma	37		
B Seznam datových příloh	39		

Obrázky

1 Citlivost elektrostatického mikrofону do jeho druhé frekvenční rezonance. [1]	1
1.1 Schéma měřicího kondenzátorového mikrofónu. Modifikace z [2].	3
1.2 Průměrná výchylka kruhové membrány ve vakuu.	6
1.3 Kompletní náhradní obvod kondenzátorového mikrofónu. Modifikace z [5].	7
1.4 Náhradní obvod kruhové membrány. Modifikace z [6].	8
1.5 Elektrostatický měnič se symbolickým schématem membrány. Převzato z[6].	11
1.6 Řez mikrofónu s menší pevnou elektrodou než je membrána.	11
1.7 Kmitání membrány na nižších a vyšších kmitočtech.	12
2.1 Citlivost mikrofónu ve vakuu a ve vzduchu.	14
2.2 Citlivost mikrofónu při různých hodnotách parametrů náhradního obvodu mikrofónu a) vzduchové mezery mezi elektrodami, b) mechanického napětí membrány a c) objemu zadní dutiny mikrofónu. ..	15
2.3 Citlivost mikrofónu do druhé rezonanční frekvence.	17
3.1 Komponenty mikrofónu.	19
3.2 Frekvenční charakteristika mikrofónu typu 4189. [12]	20
3.3 Schéma měření ve vzduchu pomocí referenčního mikrofónu.	21
3.4 Detail měřeného a měřicího mikrofónu.	21
3.5 Schéma měření buzení membrány pomocí elektrostatické mřížky. Modifikace z [5].	22
3.6 Detail elektrostatické budící mřížky.	23
3.7 Zapojení pro měření ve vakuu. . .	23
3.8 Porovnání citlivosti ve vzduchu. . .	24
3.9 Porovnání normalizovaných citlivostí ve vzduchu s budící mřížkou.	25
3.10 Porovnání výstupního napětí mikrofónu ve vakuu.	26
3.11 App Designer v prostředí Matlab k návrhu poloměrů R_{Cu} a R_e	27
3.12 Porovnání pevné elektrody prototypu a návrhu.	28
3.13 Schéma regulátoru napětí [16] a invertoru napětí [17].	28
3.14 Schéma zapojení audio operačního zesilovače [18].	29
3.15 Citlivost ve vzduchu.	30
3.16 Tištěné podložky "spacing" pro lepší dotahování.	31
3.17 Tištěný utahovací držák a klíč. . .	31
3.18 Nástroje na dotažení membrány mikrofónu.	31
A.1 Schéma zapojení pevné elektrody menší, než je membrána.	37

Tabulky

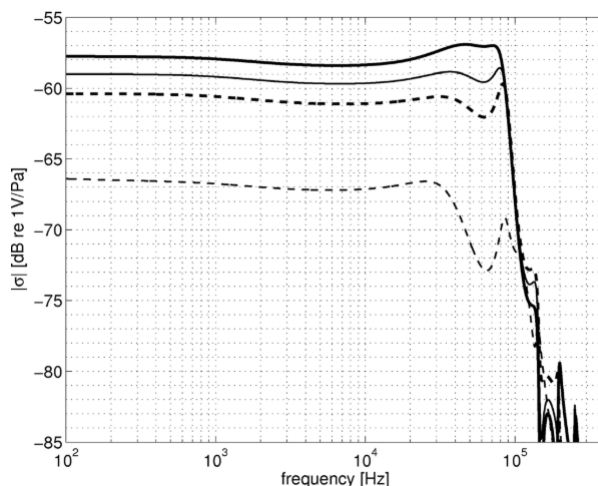
1.1 Hodnoty pro výpočet průměrné výchylky kruhové membrány.	6
2.1 Parametry pro náhradní obvod mikrofonu.	13
2.2 Hodnoty poloměrů pokovení a pevné elektrody pro obrázek 2.3...	16
3.1 Vlastnosti mikrofonu typu 4189. [12]	20
3.2 Hodnoty pro výpočet vstupního tlaku budící mřížky.	25
B.1 Seznam datových příloh v Altium Designer.	39
B.2 Seznam datových příloh v Matlabu	40

Úvod

Pokud člověk hledá mikrofon za účelem přesného měření nebo kvalitního nahrávání zvukového záznamu ve studiu, kde se klade důraz na důležité parametry, jako jsou vysoká citlivost a vyrovnaná frekvenční charakteristika, tak tyto podmínky budou nejlépe splňovat elektrostatické (kondenzátorové) mikrofony. V porovnání například s dynamickými mikrofony jsou dražší a svou konstrukcí náchylnější k poškození.

V této práci se budu zabývat seznámením se s teorií elektrostatického mikrofonu, simulací a měřením prototypu, pro který udělám optimalizaci a návrh nové pevné elektrody mikrofonu.

Konkrétně se budu zabývat elektrostatickým mikrofonem, jehož pevná elektroda, která tvoří společně s vodivou pohyblivou elektrodou (membránou) kondenzátor, je menší právě než pohyblivá elektroda. To má taková specifika, že lze získat citlivost mikrofonu s téměř rovným průběhem až do druhé rezonanční frekvence mikrofonu, viz obrázek 1.



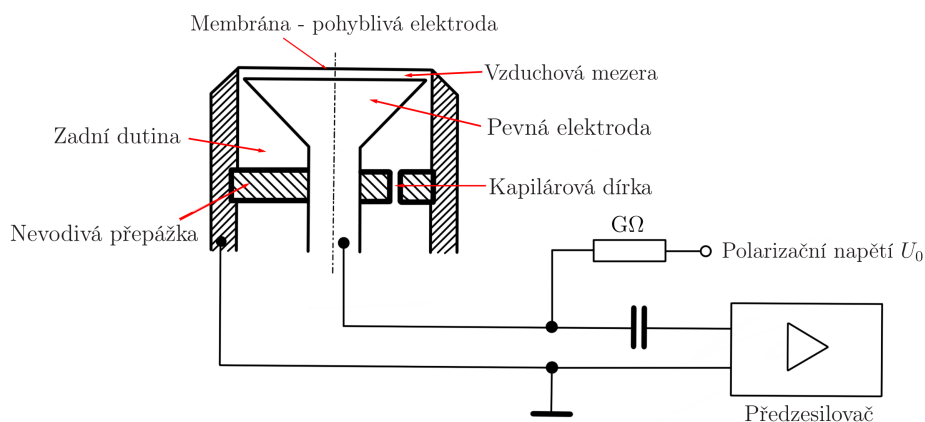
Obrázek 1: Citlivost elektrostatického mikrofonu do jeho druhé frekvenční rezonance. [1]

Kapitola 1

Teoretická část

1.1 Elektrostatický mikrofon

Elektrostatický (kondenzátorový) mikrofon patří do skupiny elektrostatických měničů, které fungují na principu přeměny mechanického vlnění na elektrický signál. Zvuková vlna rozkmitává vodivou membránu mikrofonu, která je zároveň pohyblivou elektrodou kondenzátoru. Společně s pevnou elektrodou, která je připojena na polarizační napětí U_0 , tvoří kondenzátor, u kterého pohybem membrány vzniká změna kapacity. Výstupní napětí mikrofonu je snímáno předzesilovačem se vstupní impedancí v řádech $G\Omega$. Příklad měřícího kondenzátorového mikrofonu je znázorněn na obrázku 1.1



Obrázek 1.1: Schéma měřícího kondenzátorového mikrofonu. Modifikace z [2].

Náboj na kondenzátoru je dán vztahem $Q = CU$, kde U je napětí na kondenzátoru a C je celková statická kapacita, která je zároveň součtem $C = C_0 + C_p$, kde C_0 je aktivní statická kapacita a C_p je parazitní kapacita. Aktivní statická kapacita je určena vztahem $C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{h_g}$, kde ϵ_0 je permitivita vakua, S je aktivní plocha kondenzátoru tzn. překryv membrány a pevné elektrody a h_g je tloušťka vzduchové mezery mezi elektrodami.

Celkový diferenciál náboje může být vyjádřen jako [3][4]

$$dQ = dCU + CdU. \quad (1.1)$$

Celkové napětí na výstupu kondenzátorového mikrofonu je $U = U_0 + u$, které je složeno ze statické složky polarizačního napětí U_0 a proměnlivé složky výstupního napětí u , která je způsobena změnou kapacity dC . Vzhledem k tomu, že $u \ll U_0$ lze předpokládat $dU \approx u$ a $U \approx U_0$. Jelikož polarizační napětí U_0 je vedeno přes rezistor s velkou hodnotou ($G\Omega$), tak kolísání náboje je možné zanedbat $dQ \approx 0$. Zjednodušený vztah pro výstupní napětí vypadá následovně [3][4]

$$u = -U_0 \frac{dC}{C}. \quad (1.2)$$

Změna kapacity v čase je rovna změně průměrné výchylky membrány $\tilde{\xi}(t)$ nad aktivní plochou kondenzátoru S jako [3][4].

$$C_t(t) = C_p + \frac{\varepsilon_0 S}{h_g + \tilde{\xi}(t)} = C_p + C_0 \frac{1}{1 + \frac{\tilde{\xi}(t)}{h_g}}. \quad (1.3)$$

Pomocí Taylorova rozvoje funkce $\frac{1}{1+x} = 1 - x + x^2 - x^3 + \dots$ a za předpokladu, že celková kapacita je $C_t(t) = C_p + C_0 + dC(t)$ se může změna celkové kapacity vyjádřit coby [3][4]

$$dC(t) = -C_0 \left[\frac{\tilde{\xi}(t)}{h_g} - \left(\frac{\tilde{\xi}(t)}{h_g} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{\xi}(t)}{h_g} \right)^3 - \dots \right]. \quad (1.4)$$

Dosazením změny celkové kapacity $dC(t)$ do rovnice (1.2), bude výstupní napětí elektrostatického mikrofonu v závislosti na čase bude stanoveno právě takto

$$u(t) = U_0 \frac{C_0}{C_p + C_0} \left[\frac{\tilde{\xi}(t)}{h_g} - \left(\frac{\tilde{\xi}(t)}{h_g} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{\xi}(t)}{h_g} \right)^3 - \dots \right]. \quad (1.5)$$

Jelikož tato práce se dále zabývá pouze lineárním modelem mikrofonu, tak členy $\frac{\tilde{\xi}(t)}{h_g}$ v rovnici (1.5) s mocninou 2 a vyšší lze zanedbat. Pro další zjednodušení se zanedbá i parazitní kapacita mikrofonu C_p . Po těchto úpravách je výstupní napětí pro lineární model mikrofonu získáno vztahem

$$u(t) = U_0 \frac{\tilde{\xi}(t)}{h_g}. \quad (1.6)$$

1.2 Citlivost mikrofonu

Citlivost mikrofonu je definována jako výstupní napětím ku vstupnímu tlaku na membráně $\sigma = \frac{u}{p_{in}}$. Po dosazení do rovnice (1.2) s tím, že bude záviset dC na $\tilde{\xi}$ a C na h_g , bude citlivost mikrofonu po úpravách rovna [5]

$$\sigma = U_0 \frac{\tilde{\xi}}{p_{in} h_g}. \quad (1.7)$$

1.3 Výchylka kruhové membrány

V sekci 1.2 byl upřesněn vztah pro výpočet citlivosti mikrofonu, kde zbývá zjistit průměrnou výchylku ξ . Nejprve je potřeba zavést okamžitou výchylku membrány ξ .

Pro radiálně symetrické vynucené kmity buzené harmonicky proměnným tlakem \mathbf{p} , který má konstantní velikost na celé ploše membrány, bude získána vlnová rovnice výchylky membrány. Tučně jsou vyznačeny fázory [6]

$$\frac{d^2\xi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\xi}{dr} + k_M^2 \xi = -\frac{\mathbf{p}}{T}, \quad (1.8)$$

kde ξ je výchylka membrány, r je radiální prostorová souřadnice, T je mechanické napětí membrány a $k_M = \frac{\omega}{c_M} = 2\pi f / \sqrt{\frac{T}{m_1}}$ je vlnové číslo, f je frekvence akustické vlny, c_M je rychlost vlny šířící se na membráně a $m_1 = \rho_m h_m$ je plošná hustota membrány, kde ρ_m je hustota materiálu membrány a h_m tloušťka membrány. Řešením rovnice (1.8) je vztahu [6]

$$\xi(k_M r) = -\frac{\mathbf{p}}{T k_M^2} + \mathbf{A}_0 J_0(k_M r) + \mathbf{B}_0 N_0(k_M r), \quad (1.9)$$

kde J_0 je Besselova funkce nultého řádu, N_0 je Neumannova funkce nultého řádu a \mathbf{A}_0 a \mathbf{B}_0 jsou integrační konstanty. Díky podmínkám konečnosti řešení v počátku je $\mathbf{B}_0 = 0$ a z nehybnosti membrány na okraji $\xi(k_M R) = 0$, kde R je poloměr membrány je získáno \mathbf{A}_0 . Rovnice výchylky je poté následující [6]

$$\xi = \frac{\mathbf{p}}{T k_M^2} \left(\frac{J_0(k_M r)}{J_0(k_M R)} - 1 \right) \quad (1.10)$$

1.4 Průměrná výchylka kruhové membrány

V sekci 1.3 byl popsán vztah pro okamžitou výchylku membrány ξ , ale v rovnici (1.7) figuruje průměrná výchylka membrány $\tilde{\xi}$, která bude potřeba právě pro stanovení citlivosti mikrofonu. V případě této práce se jedná o kruhovou membránu, a tak je její průměrná výchylka získána zintegrováním okamžité výchylky membrány ξ přes plochu S a vydělením touto plochou [6]

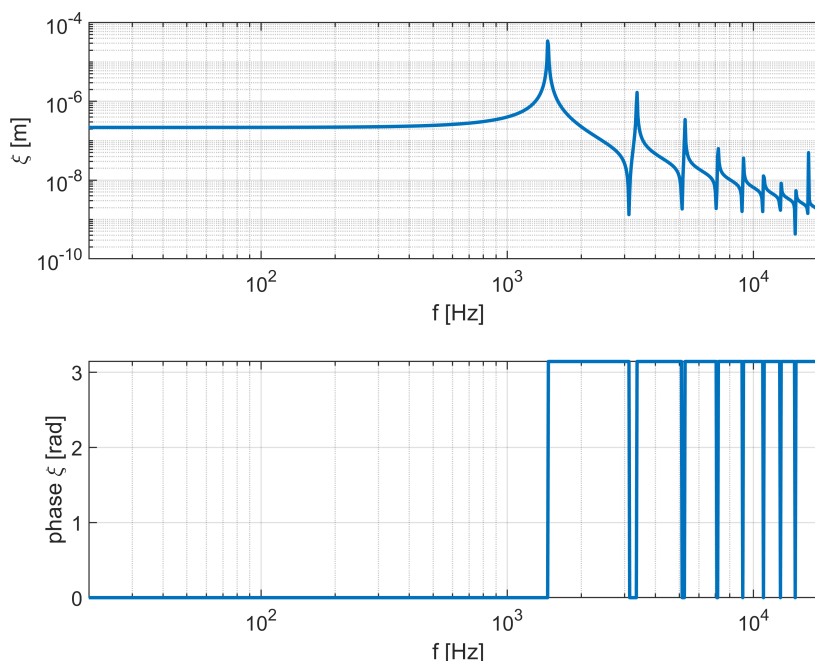
$$\tilde{\xi} = \frac{1}{S} \iint_S \xi(r) dS = \frac{p}{T k_M^2} \left(\frac{J_2(k_M R)}{J_0(k_M R)} \right), \quad (1.11)$$

kde J_2 je Besselova funkce druhého řádu.

Na obrázku 1.2 je znázorněna průměrná výchylka membrány ve vakuu v závislosti na frekvenci pro hodnoty z tabulky 1.1. Díky tomu, že se jedná o simulaci ve vakuu, tak jsou zřetelná místa, kde se nachází jednotlivé rezonance mikrofonu. Frekvenční rozsah pro tento případ je slyšitelné pásmo, tedy od 20 Hz do 20 kHz.

Tabulka 1.1: Hodnoty pro výpočet průměrné výchylky kruhové membrány.

Parametr	Hodnota	Jednotka	Popis
p	1	Pa	akustický tlak
T	100	$N \cdot m^{-1}$	mechanické napětí membrány
ρ_m	7850	$kg \cdot m^{-3}$	hustota oceli
h_m	5	μm	tloušťka membrány
R	13,2	mm	poloměr membrány

**Obrázek 1.2:** Průměrná výchylka kruhové membrány ve vakuu.

1.5 Náhradní obvod mikrofonu

Náhradní obvod mikrofonu lze popsat jako soustavu, kterou tvoří mechanické impedance. Celkovou mechanickou impedanci je možné určit z elektrického systému zobecněného Ohmova zákona $Z = \frac{u}{i}$, na základě analogie pro mechanický systém, kde z napětí u odpovídá síle \mathbf{F} a proudu i odpovídá rychlosti \mathbf{v} . Po další úpravě je získán vztah, kde se vyskytuje i průměrná výchylka membrány $\tilde{\xi}$ [6][7]

$$Z_{mech} = \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{v}} = \frac{pS}{j\omega\tilde{\xi}}. \quad (1.12)$$

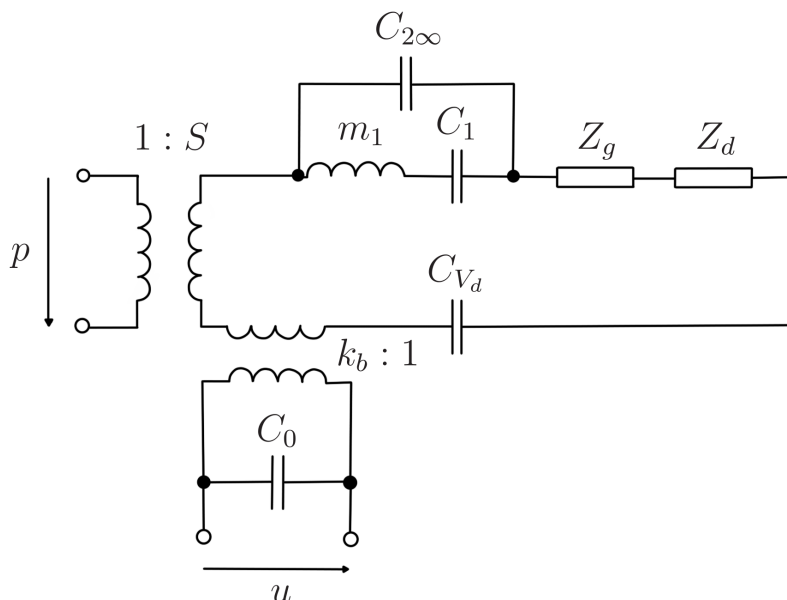
Celkovou mechanickou impedanci tvoří součet jednotlivých dílčích impedancí náhradního obvodu, jako jsou impedance membrány Z_{mem} , prostoru mezi elektrodami Z_g , děr v pevné elektrodě Z_d a zadní dutiny mikrofonu $Z_{C_{V_d}}$.

$$Z_{mech} = Z_{mem} + Z_g + Z_d + Z_{C_{V_d}}. \quad (1.13)$$

Pokud se z rovnice (1.12) vyjádří průměrná výchylka membrány ξ a dosadí se do vztahu (1.7), tak vznikne citlivost pro náhradní obvod mikrofonu, ale jen s přesností do první frekvenční rezonance mikrofonu.

$$\sigma = U_0 \frac{S}{j\omega Z_{mech} h_g}. \quad (1.14)$$

Na obrázku 1.3 je nastíněn kompletní náhradní obvod kondenzátorového mikrofonu, který se skládá ze všech jeho dílčích částí. Příchozí akustický tlak p je pomocí mechanicko-akustického transformátoru s poměrem $1 : S$ přeměněn na sílu. Výstupní mechanicko-elektrický transformátor s poměrem $k_b : 1$, kde $k_b = \frac{C_0 U_0}{h_g}$ je činitel převodníku, který mění vstupní veličinu obvodu na výstupní napětí u . Náhradní obvod nepočítá s akustickým zkratem na velmi nízkých frekvencích, který způsobuje kapilárová dírka pro vyrovnání statického tlaku.



Obrázek 1.3: Kompletní náhradní obvod kondenzátorového mikrofonu. Modifikace z [5].

1.5.1 Mechanická impedance kruhové membrány

Náhradní obvod membrány, který je zobrazen na obrázku 1.4, tvoří paralelní kombinace inertoru a elastoru v sérii.

Inertor představuje hmotnost membrány m a pro náš případ bude omezena pouze na m_1 , protože na nízkých frekvencích hmotnosti m_2 až m_i model neovlivní. Vztah pro m_1 je [6][7]

$$m_1 = \frac{x_1^2 m_1 S}{4}, \quad (1.15)$$

kde $x_1 \approx 2,4048$ je první řešení rovnice $J_0(x_i) = 0$.

Elastor představuje poddajnost membrány C . Vztahy poddajností jsou následující [6][7].

$$C_1 = \frac{4}{x_1^4 \pi T} \quad (1.16)$$

$$C_\infty = \sum_{i=1}^{\infty} C_i = \frac{1}{8\pi T} \quad (1.17)$$

$$C_{2\infty} = C_\infty - C_1. \quad (1.18)$$

Sériová kombinace m_1 a C_1 udává první rezonanční frekvenci mikrofону a kvazistatická poddajnost $C_{2\infty}$ upravuje chování membrány na nízkých kmitočtech.

Mechanická impedance je poté řešena podobně jako je tomu v elektrických obvodech a tedy sériová kombinace je

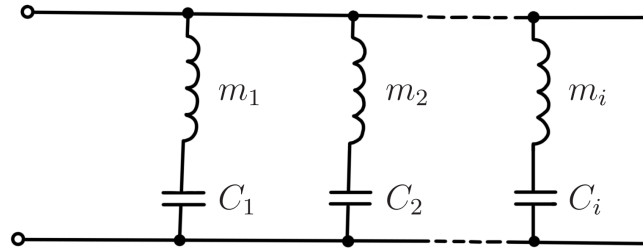
$$Z_{mem_1} = \frac{1}{j\omega C_1} + j\omega m_1 \quad (1.19)$$

a pro kvazistatickou poddajnost je mechanická impedance ve tvaru

$$Z_{mem_2} = \frac{1}{j\omega C_{2\infty}}. \quad (1.20)$$

Celková mechanická impedance kruhové membrány je poté tvořena paralelní kombinací obou mechanických impedancí membrány

$$Z_{mem} = \frac{Z_{mem_1} Z_{mem_2}}{Z_{mem_1} + Z_{mem_2}}. \quad (1.21)$$



Obrázek 1.4: Náhradní obvod kruhové membrány. Modifikace z [6].

1.5.2 Mechanická impedance prostoru mezi elektrodami

Je možné rozdělit mechanické impedance na dva typy a to na vzduchové mezery s obvodovým (bez díry) a se středovým vyústěním. Mechanická impedance je vypočtena jako součet reálného mechanického odporu R_g a imaginární mechanické hmotnosti m_g .

$$Z_g = R_g + j\omega m_g. \quad (1.22)$$

Pro vzduchové mezery bez díry jsou mechanický odpor a mechanická hmotnost následující [6][7]

$$R_g = \frac{3\mu\pi X_0^4}{2h_g^3}, \quad (1.23)$$

$$m_g = \frac{3\rho_0\pi X_0^4}{20h_g^3}. \quad (1.24)$$

a pro vzduchové mezery se středovým vyústěním jsou [5][6][7]

$$R_g = N \left(\frac{6\mu\pi\beta X_0^4}{h_g^3} \right), \quad (1.25)$$

$$m_g = N \left(j\omega \frac{\rho_0\pi\beta X_0^4}{2h_g} \right) \quad (1.26)$$

kde N je počet děr v pevné elektrodě, μ je smyková dynamická viskozita, ρ_0 je hustota vzduchu, $X_0 = \sqrt{\frac{S}{N\pi}}$ je ekvivalentní kruhová oblast shromažďování vzduchového proudu z každého otvoru a funkce β je dána rovnicí [5][6][7]

$$\beta = \ln \frac{X_0}{R_0} - \frac{3}{4} + \frac{R_0^2}{X_0^2} - \frac{R_0^4}{4X_0^4}, \quad (1.27)$$

kde R_0 je poloměr (děr) kruhového vyústění.

1.5.3 Mechanická impedance děr v pevné elektrodě

Mechanická impedance děr je definovaná jako impedance válcové trubice, která vychází ze zjednodušeného vzorce pro Navierovu-Stokesovu rovnici. Obdobně jako v sekci 1.5.2 se mechanická impedance bude skládat ze součtu reálného akustického odporu R_d a imaginární akustické hmotnosti m_d . Pro správný přepočítání z akustické impedance na mechanickou je potřeba vynásobit S^2 [6][7]

$$Z_d = \frac{S^2}{N} (R_{d_{ak}} + j\omega m_{d_{ak}}). \quad (1.28)$$

Obě složky akustické impedance se vypočítají podle těchto vzorců z [6][7]

$$R_{d_{ak}} = \frac{8\mu h_h}{\pi R_0^4}, \quad (1.29)$$

$$m_{d_{ak}} = j\omega \frac{4\rho_0 h_h}{3\pi R_0^2}. \quad (1.30)$$

kde h_h je tloušťka pevné elektrody, což je stejná hodnota jako hloubka jednotlivých děr.

1.5.4 Mechanická impedance zadní dutiny mikrofonu

Nejprve se stanoví akustická poddajnost, pro kterou je dominantním prvkem akustický elastor. Zadní dutina o objemu $V_d = Sh_d$, kde h_d je hloubka zadní dutiny za pevnou elektrodou, má poddajnost [6][7]

$$C_{V_d} = \frac{V_d}{\rho_0 c_0^2}, \quad (1.31)$$

kde c_0 je adiabatická rychlost zvuku.

Následně mechanická impedance zadní dutiny se vypočítá jako

$$Z_{C_{V_d}} = S^2 \frac{1}{j\omega C_{V_d}}, \quad (1.32)$$

kde S^2 se použije stejně jako v rovnici (1.28).

1.5.5 Kvazistatická stabilita elektrostatického měniče

Kvazistatická stabilita měniče je v zásadě určena dvěma hlavními faktory. Těmi jsou intenzita elektrického pole v mezeře měniče a mechanická tuhost pohyblivé elektrody tzn. membrány mikrofonu. Po připojení polarizačního napětí k měniči přes velký polarizační odpor ($G\Omega$) narůstá napětí mezi elektrodami měniče, membrána se přitahuje k pevné elektrodě a ustavuje se po dosažení plného napětí v pracovní vzdálenosti, v níž jsou v rovnováze elektrostatická síla a reakce tuhosti membrány. Tato situace nastane pouze tehdy, bude-li tuhost membrány dostatečně velká (elektrody se k sobě nepřichytí) a nedojde-li při přiblížení membrány k pevné elektrodě k porušení elektrické pevnosti vzduchového dielektrika (nepřeskočí náboj z jedné elektrody na druhou). [6]

Na obrázku 1.5 je nastíně elektrostatický měnič, jehož pohyblivá elektroda se nachází před připojením polarizačního napětí U_0 ve vzdálenosti a od pevné elektrody. Mechanickou část měniče tvoří elastor s tuhostí $s = \frac{1}{C}$, rezistor r a inertor m . Připojíme-li k měniči polarizační napětí, membrána se přiblíží k pevné elektrodě na vzdálenost l a považujeme výchylku ξ za pístové kmitání.

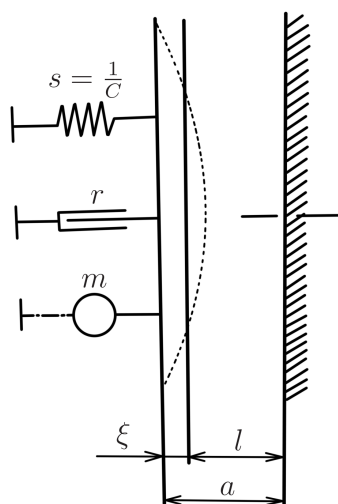
Tuhost s má minimální přípustnou velikost odpovídající tuhosti na mezi stability, která je rovna [6]

$$s_{min} = \frac{\varepsilon_0 S U_0^2}{l_{min}^3}, \quad (1.33)$$

kde $l_{min} = \frac{2}{3}a$ je vzdálenost mezi elektrodami, která odpovídá mezi stability. Soustava membrána - pevná elektroda bude stabilní za předpokladu splnění nerovnosti [6]

$$s > \frac{\varepsilon_0 S (1 - A) U_0^2}{\left(\frac{2}{3}a\right)^3}, \quad (1.34)$$

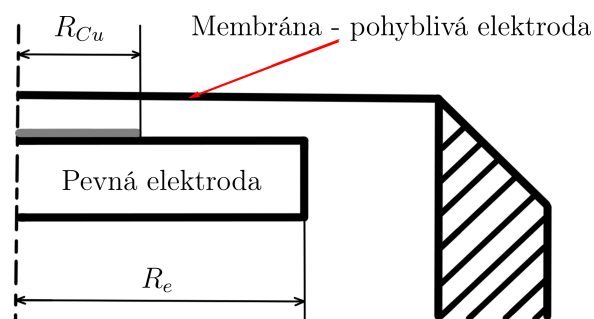
kde A je činitel děrování, který je definovaný jako poměr plochy děr v pevné elektrodě k celkové ploše pevné elektrody bez děr.



Obrázek 1.5: Elektrostatický měnič se symbolickým schématem membrány. Převzato z[6].

1.6 Pevná elektroda menší než membrána

Tato práce se také zabývá menší pevnou elektrodou než je membrána mikrofonu. Na obrázku 1.6 je nastíněn osově souměrný řez mikrofonem s pohledem na obě elektrody.



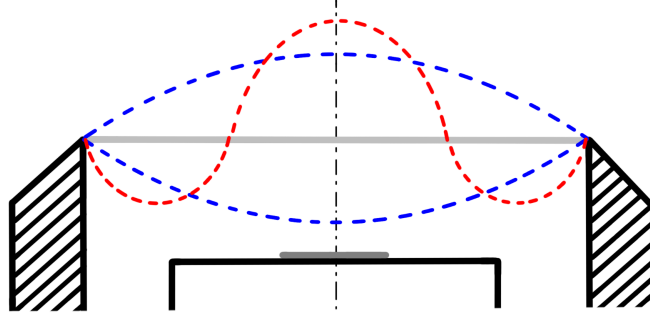
Obrázek 1.6: Řez mikrofonu s menší pevnou elektrodou než je membrána.

Na obrázku 1.6 je R_{Cu} poloměr pokovené části pevné elektrody a R_e je poloměr menší pevné elektrody.

Hlavní využití tohoto principu je demonstrováno¹ na obrázku 1.7, kde je viditelné kmitání membrány na nižším (modrá křivka) a vyšším (červená křivka) kmitočtu. Pokovená část pevné elektrody je menší, aby její velikost zasahovala pouze do druhého módu průměrné výchylky membrány (mezi uzly kmitající membrány). Čím menší je poloměr pokovení, tím menší je pokles výchylky mezi frekvenčními rezonancemi. Poloměr elektrody je větší, aby se

¹Pro přehlednost obrázku 1.7 mají pevná elektroda a membrána mezi sebou větší mezeru.

více tlumili frekvenční rezonance. Po vhodné kombinaci poloměrů R_{Cu} a R_e by se měla křivka citlivosti mikrofону tvarem podobat té v úvodu 1.



Obrázek 1.7: Kmitání membrány na nižších a vyšších kmitočtech.

Analytický popis vychází z [1][8] ze soustavy vázaných rovnic. První rovnice je pro membránu. [1][8]

$$T(\Delta_r + k_M^2)\xi(r) = p_{in} - p_{insd}(r), \quad (1.35)$$

kde Δ_r je Laplaceův operátor v polárních souřadnicích, p_{in} je vstupní tlak a p_{insd} je vnitřní tlak složený jako

$$p_{insd}(r) = \begin{cases} p_g(r), & r \in (0, R_e) \\ p_d(r), & r \in (R_e, R), \end{cases} \quad (1.36)$$

kde p_g je tlak ve vzduchové mezeře mezi elektrodami, p_d je tlak v zadní dutině mikrofону, v našem případě považovaný za uniformní v celé dutině [9]. Druhá vázaná rovnice je pro akustický tlak ve vzduchové mezeře mezi elektrodami [1][8]

$$\Delta_r p_{insd}(r) + \chi_g^2 p_{insd}(r) = \zeta_{insd} \xi(r), \quad (1.37)$$

kde χ_g je komplexní vlnové číslo zahrnující termoviskózní ztráty a ζ_{insd} je konstanta ve zdrojovém členu, obojí dáno [8]. Výchylka membrány se hledá ve formě řady přes vlastní funkce kruhové membrány $\Psi_n(r)$ s příslušnými modálními koeficienty ξ_n [1][8]

$$\xi(r) = \sum_n \xi_n \Psi_n(r). \quad (1.38)$$

Narozdíl od článků [1][9], kde se předpokládá pokovení celé elektrody a průměrné výchylka je tudíž počítána přes poloměr R_e , je zde uvažováno pokovení o poloměru R_{Cu} . Průměrná výchylka je počítána přes tento vzorec

$$\tilde{\xi}_{S_{Cu}} = \frac{1}{S_{Cu}} \iint_{S_{Cu}} \xi(r) dS_{Cu} = \frac{2}{\sqrt{\pi} R_{Cu} R} \sum_n \xi_n \frac{J_1(k_n R_{Cu})}{k_n J_1(k_n R)}. \quad (1.39)$$

kde kn je vlastní číslem, viz [1][8].

Kapitola 2

Výsledky modelu mikrofону

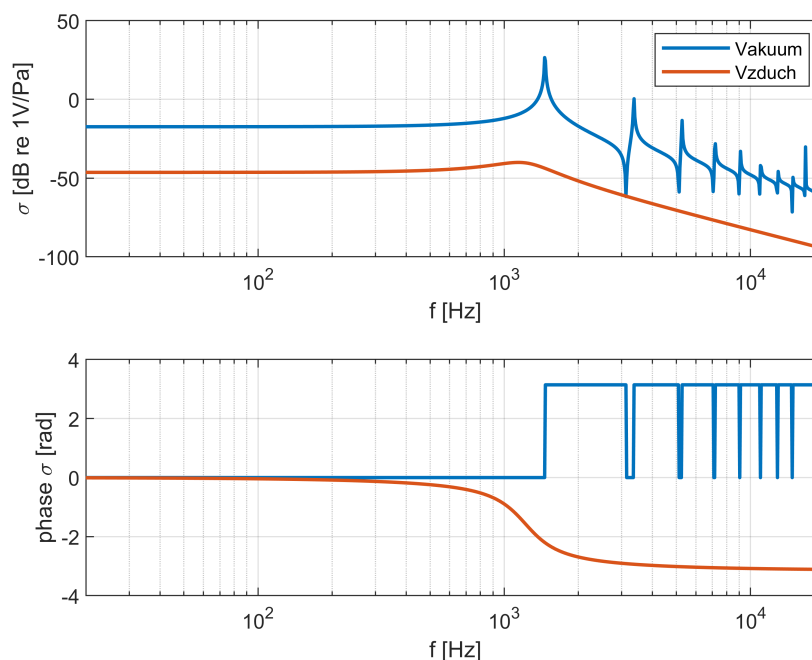
V kapitole 1 byl odvozen náhradní obvod mikrofónu, který bude v této kapitole podroben simulaci pro jednotlivé jeho parametry. Také je zde obsaženo, jak se bude chovat průběh citlivosti mikrofónu, pokud se změní některý z parametrů a neposlední řadě citlivost mikrofónu až do druhé rezonanční frekvence. Všechny simulace jsou vypočítány a zobrazeny v prostředí MATLAB.

Tabulka 2.1: Parametry pro náhradní obvod mikrofónu.

Parametr	Hodnota	Jednotka	Popis
p	1	Pa	akustický tlak
T	100	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	mechanické napětí membrány
ρ_m	7850	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota oceli
h_m	5	μm	tloušťka membrány
R	13,2	mm	poloměr membrány
μ	11,83	$\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$	smyková dynamická viskozita
ρ_0	1,18	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota vzduchu
N	1	-	počet děr v pevné elektrodě
R_0	0,8	mm	poloměr díry v pevné elektrodě
h_g	145	μm	tloušťka vzduchové mezery mezi elektrodami
h_h	1,6	mm	tloušťka pevné elektrody
c	345,9	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	adiabatická rychlost zvuku
h_d	7,8	mm	hloubka zadní dutiny
V_d	4,27	μm	objem zadní dutiny
U_0	90	V	polarizační napětí

Na uvedených obrázcích je zvolený rozsah frekvence od 20 Hz do 20kHz, tedy slyšitelné pásmo.

Na obrázku 2.1 je vidět citlivosti mikrofónu, které jsou obě vypočítány podle rovnice (1.14) a parametry z tabulky 2.1. Liší se tím, že pro citlivost mikrofónu ve vakuu (modrá křivka) je mechanická impedance získána ze vzorce (1.12), kde figuruje průměrná výchylka membrány. Pro citlivost mikrofónu ve vzduchu (červená křivka) je celková mechanická impedance spočtena jako součet jejích dílčích částí podle (1.13). Vliv prostředí na náhradní obvod je zřetelný, i když přesnost citlivosti ve vzduchu je jen do první rezonanční frekvence, je poznat výrazný útlum oproti vakuu.



Obrázek 2.1: Citlivost mikrofonu ve vakuu a ve vzduchu.

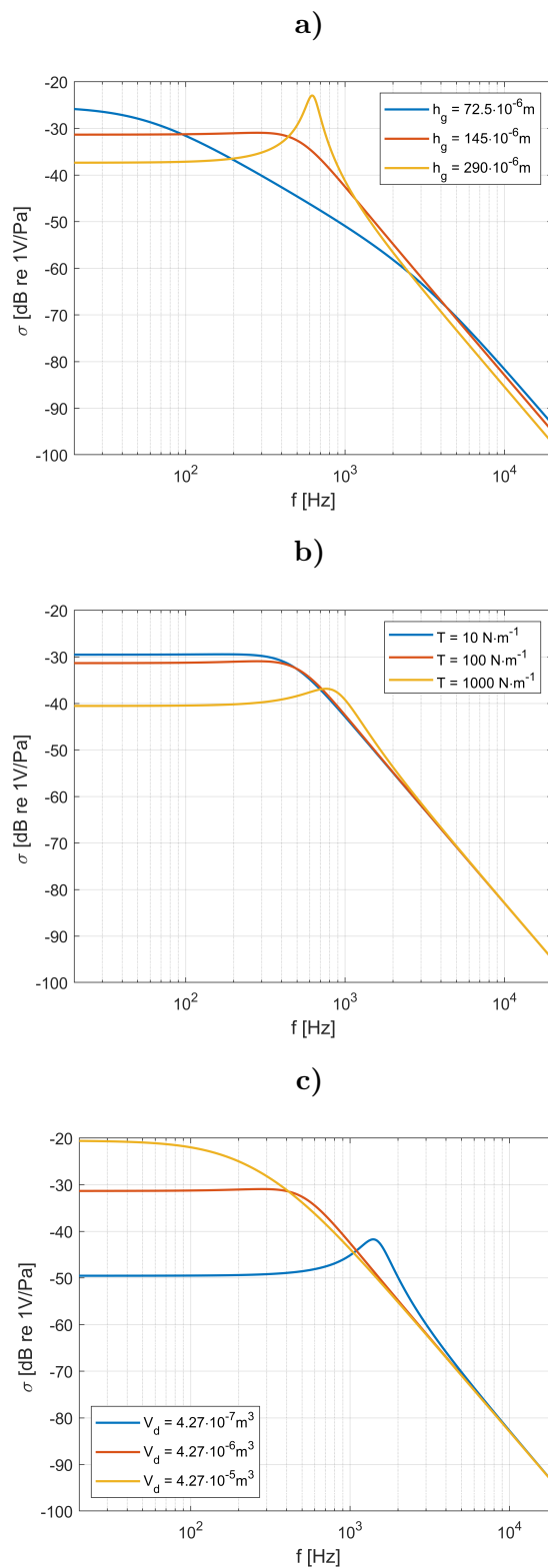
2.1 Vliv parametrů náhradního obvodu na citlivosti mikrofonu

Porovnání, jak se bude chovat citlivost mikrofonu pokud by byl změněn některý z parametrů náhradního obvodu mikrofonu je na obrázcích 2.2. Parametry, které lze pozorovat na obrázku jsou tloušťka vzduchové mezery mezi elektrodami h_g , mechanické napětí membrány T a objem zadní dutiny mikrofonu V_d .

Jak je vidno na obrázku a) čím menší je tloušťka vzduchové mezery mezi elektrodami, tím více je utlumená rezonanční frekvence mikrofonu, ale roste citlivost.

Na obrázku b) je ukázáno, že pokud je mechanické napětí membrány vyšší tzn. čím více je membrána napnuta, tím je menší výchylka a díky tomu je menší citlivost mikrofonu.

Z obrázku c) je zjištěno, že pokud je objem zadní dutiny menší, tak je menší také citlivost. Vychází-li se z náhradního obvodu pro zadní dutinu mikrofonu, tak ta se chová jako poddajnost, která je převrácenou hodnotou tuhosti. Obecně platí, že čím tužší je soustava, tím je citlivost menší.



Obrázek 2.2: Citlivost mikrofonu při různých hodnotách parametrů náhradního obvodu mikrofonu **a)** vzduchové mezery mezi elektrodami, **b)** mechanického napětí membrány a **c)** objemu zadní dutiny mikrofonu.

2.2 Model pro pevnou elektrodu menší než je membrána

Analytický modelem ICA 2013 [1], který byl poskytnut vedoucím práce, je sofistikovanějším modelem, než je náhradní obvod mikrofonu.

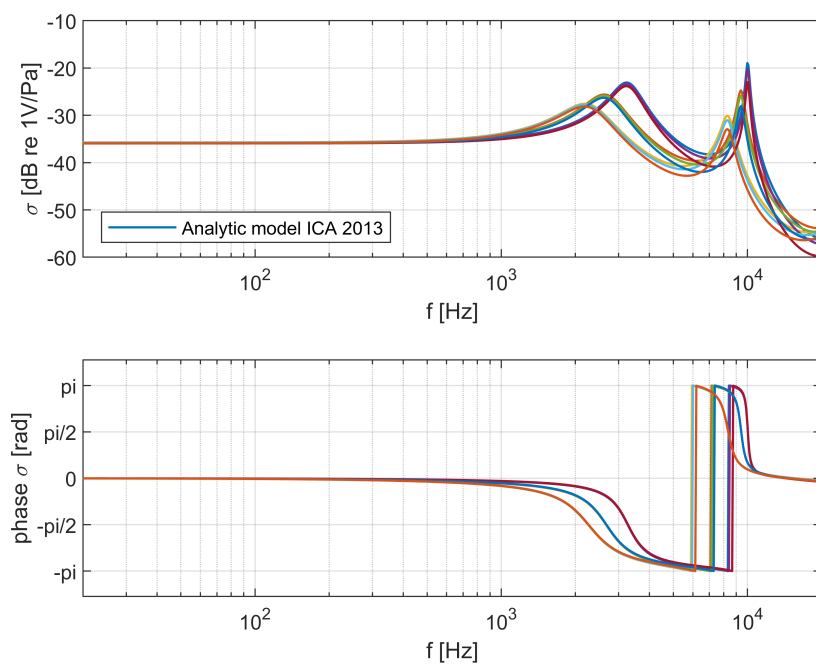
Na obrázku 2.3 je znázorněna citlivost mikrofonu až do druhé rezonanční frekvence, která je spočtena přes cykly s krokem pro oba poloměry R_e a R_{Cu} jako $R_x = \frac{R_{x_{\max}} - R_{x_{\min}}}{\text{index}}$, kde index je počet hodnot jednoho poloměru. Hodnoty pro výpočet kroku se nachází v tabulce 2.2 a zbylé parametry jsou převzaty z tabulky 2.1. Citlivost mikrofonu je v daném cyklu kombinací obou poloměrů, takže počet cyklů v kódu je roven hodnotě $\text{index} \times \text{index}$. V tomto případě se jedná o devět různých křivek citlivostí mikrofonu. Dále byly vyhodnoceny rezonanční frekvence mikrofonu, kde je počítáno s mechanickým napětím membrány, který byl změřen na prototypu, viz 3.2.5.

Tabulka 2.2: Hodnoty poloměrů pokovení a pevné elektrody pro obrázek 2.3.

index	$R_{Cu_{\max}}$ [mm]	$R_{Cu_{\min}}$ [mm]	$R_{e_{\min}}$ [mm]	$R_{e_{\max}}$ [mm]
3	1	6	8	12

Hodnoty z tabulky 2.2 jsou určeny jako krajní body, pro které je možná realizace pevné elektrody. Poloměr R_e musí být menší než poloměr membrány R (13,2 mm), který udává konstrukce mikrofonu. Také nesmí být příliš malý, aby se na něj vešly všechny součástky, více v sekci 3.3.1. Poloměr R_{Cu} musí být menší než poloměr R_e , ale zase nesmí být tak malý, aby byl možný vyrobit.

Na obrázku 2.3 je dále vidět, jak bylo zmíněno v teoretické části 1.6, že s rostoucí hodnotou poloměru membrány R_e jsou rezonanční frekvence více tlumené a pro klesající hodnotu poloměru pokovení R_{Cu} je pokles mezi rezonancemi menší.



Obrázek 2.3: Citlivost mikrofonu do druhé rezonanční frekvence.

Kapitola 3

Praktická část

Kapitola se bude zabývat měřením mikrofonů, návrhem nové pevné elektrody mikrofonu a porovnávání naměřených hodnot s daty ze simulace.

3.1 Komponenty mikrofonu

Nejjednodušší a nejlevnější způsob jak získat přijatelnou konstrukci mikrofonu je tisk na 3D tiskárně. Tištěnou konstrukci jsem nenavrhol sám, ale jednalo se o typ, který mi byl přidělen vedoucím práce, jehož větší verze se osvědčila v minulosti. Proto jsem ho používal pro celou svoji práci a to jak pro prototyp, tak i mnou navržený mikrofon. Další částí mikrofonu je membrána mikrofonu z ocelové fólie, která je tenká $5\ \mu\text{m}$. Vzduchovou mezeru mezi elektrodami nám zajišťují kovové kruhové oddělovače ("spacery"), jejichž tloušťka je $145\ \mu\text{m}$ a tedy vzduchovou mezeru určujeme právě jejich počtem. Celou konstrukci drží pohromadě malé šroubky s podložkami a matickami. Komponenty pro sestavení mikrofonu kromě pevné elektrody jsou znázorněny na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Komponenty mikrofonu.

3.2 Měření prototypu

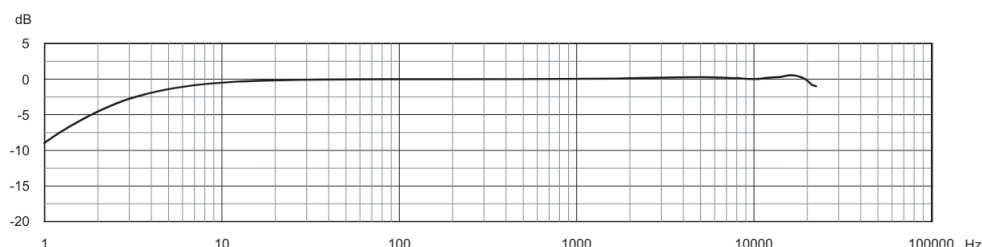
Jako v případě tištěné konstrukce, tak i pevnou elektrodu mikrofonu jsem dostal od vedoucího práce. Vcelku se jedná o menší verzi prototypu, než kterou měřili moji předchůdci [10][11]. Měření prototypu mikrofonu ve vzduchu jsem prováděl dvěma následujícími způsoby.

3.2.1 Měření mikrofonu ve vzduchu s referenčním mikrofonem

Jedním způsobem, jak změřit výstupní charakteristiku mikrofonu ve vzduchu je buzením pomocí akustického tlaku z reproduktoru, který je snímán dvěma mikrofony. Měřeným mikrofonem je můj prototyp a měřicím mikrofonem je typ 4189 od výrobce Brüel & Kjær (dále jako B&K) [12], jehož vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 3.1 a na obrázku 3.2 je jeho frekvenční charakteristika.

Tabulka 3.1: Vlastnosti mikrofonu typu 4189. [12]

Citlivost	50 mV · Pa ⁻¹
Frekvence	14,6 Hz - 20kHz
Dynamický rozsah	14,6 - 146 dB
Teplota	-30 až +150 °C
Polarizace	Prepolarizovaný

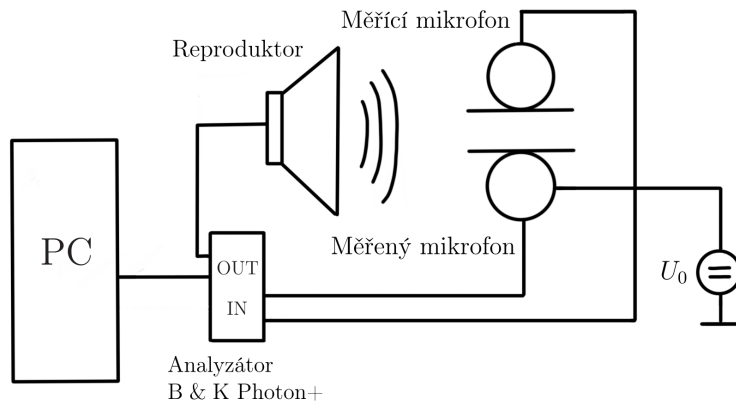


Obrázek 3.2: Frekvenční charakteristika mikrofonu typu 4189. [12]

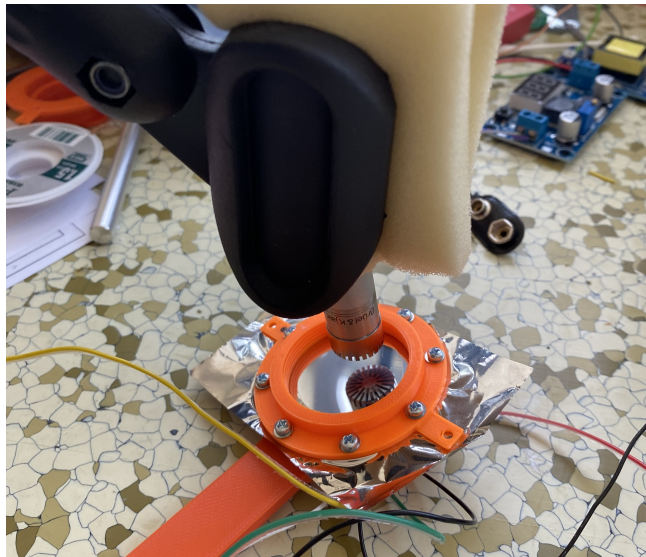
Pro zaznamenání dat z mikrofonů jsem použil analyzátor Photon+ [13], od výrobce B&K, do kterého jsou na vstup přivedeny mikrofony a výstup vede do reproduktoru a do počítače.

Celé zapojení měření je zobrazeno ve schématu 3.3, podle kterého jsem zapojil všechny zmíněné díly. Nejprve jsem otestoval, zda mi měřený mikrofon snímá a jestli je jeho výstup očekávaný. Poté jsem na počítači nastavil rozsah frekvencí slyšitelného pásma, které byly následně reproduktorem vysílány na mikrofony a zapnul jsem měření v programu. Výstupní data z měření jsou ve formě přenosové funkce mikrofonů.

Obrázek 3.4 je pořízený snímek obou mikrofonů při měření v detailu.



Obrázek 3.3: Schéma měření ve vzduchu pomocí referenčního mikrofónu.



Obrázek 3.4: Detail měřeného a měřicího mikrofónu.

3.2.2 Měření mikrofónu ve vzduchu pomocí elektrostatické budící mřížky

Dalším způsobem, jak změřit výstupní charakteristiku ve vzduchu je takový, že jako budič membrány mikrofónu se použije elektrostatická mřížka. Hlavní výhodou této metody je, že na jakémkoliv místě membrány působí budící mřížka rovnoměrně. Elektrostatická síla mezi dvěma deskami je [14]

$$F_e = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S}{d^2} U^2, \quad (3.1)$$

kde S je plocha desek (elektrostatická mřížka a membrána), d je vzdálenost mezi deskami a napětí mezi deskami $U = U_G + u$, kde U_G je polarizační napětí mřížky a u je střídavé napětí. Pro hodnotu $U^2 = U_G^2 + 2U_G u + u^2$ se

skládá elektrostatická síla ze tří komponent. [14]

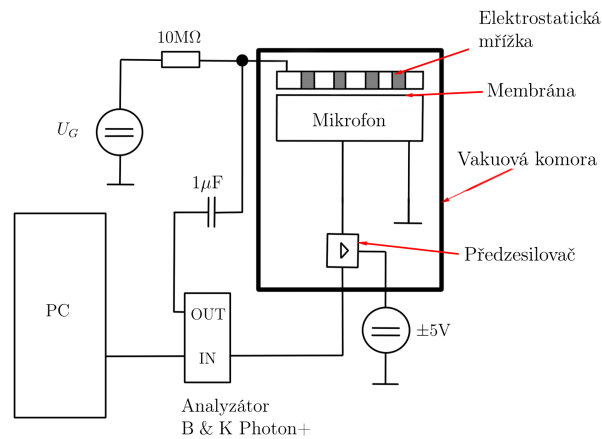
$$F_e = \underbrace{\frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 S}{d^2} U_G^2}_{\text{statická síla}} + \underbrace{\frac{\varepsilon_0 S}{d^2} U_G u}_{\text{lineární komponenta}} + \underbrace{\frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 S}{d^2} u^2}_{\text{druhá harmonická}}, \quad (3.2)$$

Pokud je polarizační napětí U_G dostatečně velké v porovnání se střídavým napětím u , tak druhou harmonickou lze zanedbat.

V případě elektrostatického buzení lze vypočítat ekvivalentní dopadající akustický tlak jako $p_{in} = \frac{F_e}{S}$. Protože mikrofon není citlivý na statický tlak v důsledku přítomnosti větracího otvoru, tak se uplatní pro ekvivalentní akustický tlak pouze druhý člen z (3.2) [14]

$$p_{in} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 U_G u}{d^2}. \quad (3.3)$$

Schéma pro měření ve vzduchu s elektrostatickou budící mřížkou je vidět na obrázku 3.5.



Obrázek 3.5: Schéma měření buzení membrány pomocí elektrostatické mřížky. Modifikace z [5].

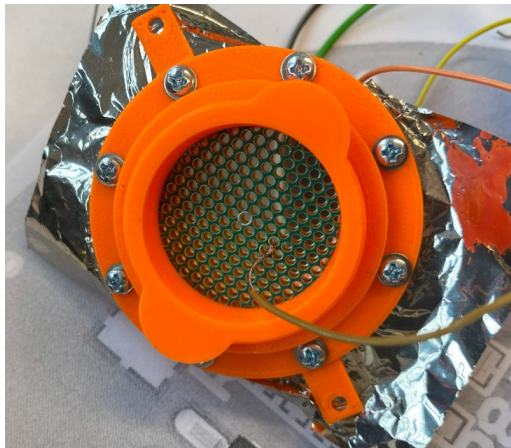
Podle schématu 3.5 jsem zapojil všechny komponenty, kde mě při měření ve vzduchu nebude zajímat vakuová komora. Stejným způsobem jako v sekci 3.2.1 jsem otestoval funkčnost mikrofonu. Následně jsem z počítače poslal na budící mřížku signál ve frekvenčním rozsahu slyšitelného pásma a zaznamenal jsem měření v programu. Výstupní data jsou opět formě přenosové funkce mikrofonů.

Fotografie detailu elektrostatické budící mřížky při měření je vidět na obrázku 3.6

3.2.3 Měření mikrofonu ve vakuu

Pro měření ve vakuu se použije metoda měření s elektrostatickou budící mřížkou, a proto schéma zapojení 3.5 zůstane stejné i ve vakuu.

Ještě předtím než jsem vložil všechny části měřené soustavy do vakuové komory, bylo potřeba ošetřit všechny vystupující vodivé kontakty, aby nedošlo při měření ke zkratu. Zdroje polarizačních napětí, jak pro budící mřížku, tak pro mikrofon samotný, jsem vložil do antistatického ochranného sáčku a zbylé drátky jsem obalil lepící páskou. Poté jsem naskládal vše do vakuové komory, otestoval jsem funkci mikrofonu a pomocí trubice se začal vysávat vzduch pryč z komory. Po době čekání se tlak v komoře ustálil na hodnotu 3,8 Pa a začal jsem měřit a zaznamenávat data. Snímek z měření ve vakuové komoře, viz 3.7.



Obrázek 3.6: Detail elektrostatické budící mřížky.



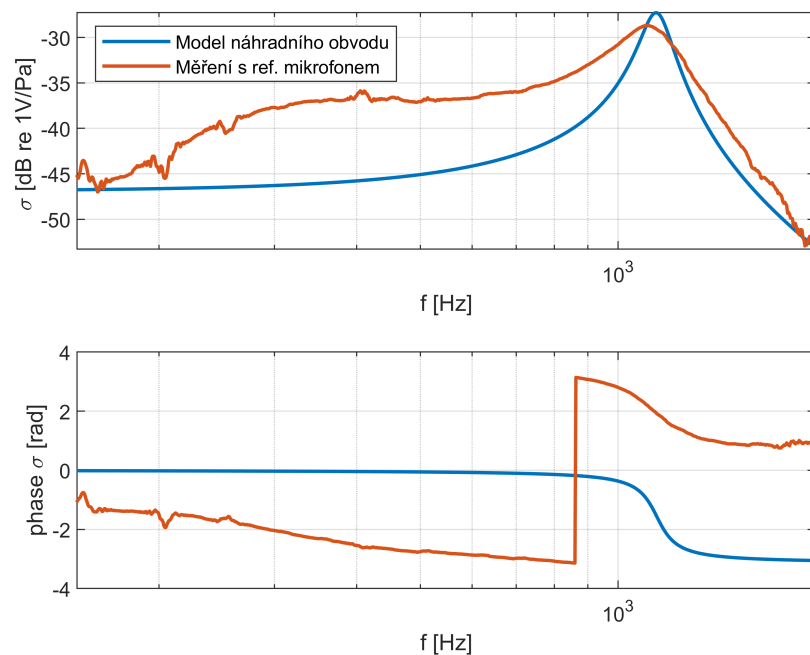
Obrázek 3.7: Zapojení pro měření ve vakuu.

■ 3.2.4 Porovnání měření a výsledků modelů

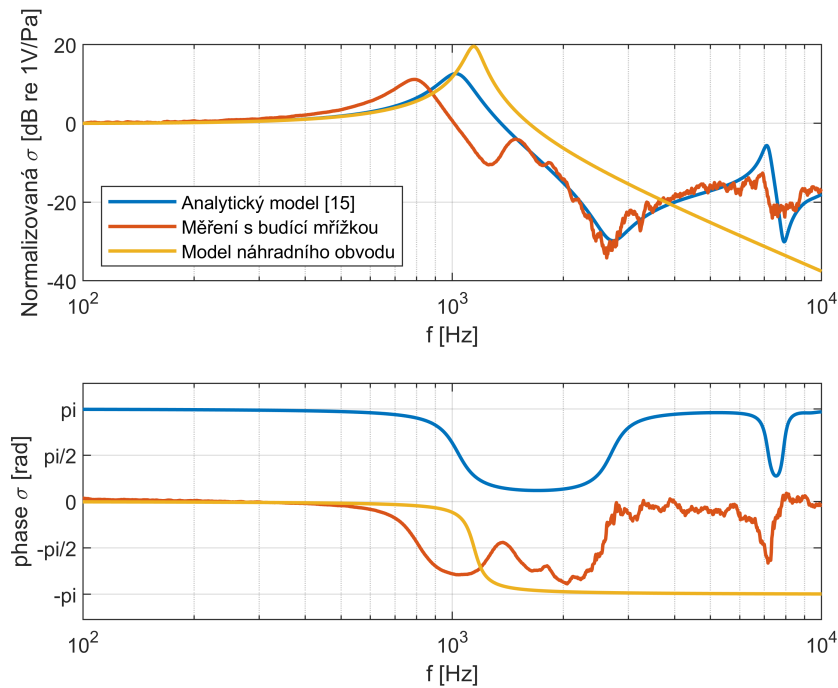
Následující grafy zobrazují výsledky modelů v porovnání se všemi dříve zmíněnými metodami měření. Při všech měřeních jsem používal tloušťku mezery mezi elektrodami $h_g = 290 \mu\text{m}$, což je hodnota odpovídající dvěma "spacerům".

V grafu 3.8 je porovnání citlivostí modelu náhradního obvodu a měření ve vzduchu s referenčním mikrofonom, při polarizačním napětí $U_0 = 60$ V. Změřená citlivost je větší, než citlivost spočtená modelem, což může být například zmenšením vzduchové mezery mezi elektrodami v důsledku statické výchylky membrány po připojení polarizačního napětí.

V dalším grafu 3.9 je k vidění porovnání hned tří křivek, kterými jsou měření ve vzduchu pomocí elektrostatické budící mřížky, model náhradního obvodu mikrofону a analytický model [15], který jsem obdržel od vedoucího práce. Jedná se o normalizovanou citlivost mikrofону, protože buzení elektrostatickou mřížkou je zde považováno za relativní, jelikož tloušťka mezery mezi mřížkou a membránou není známa s dostatečnou přesností. Proto je podstatnější tvar křivky než její hodnota. Změřená citlivost vykazuje posun rezonanční frekvence oproti modelům, což se nedělo v případě měření s referenčním mikrofonom. Mohlo tedy dojít k mechanické změně na měničích při připevnění elektrostatické mřížky. V tabulce 3.2 jsou potřebné hodnoty k dopočítání vstupního tlaku p_{in} budící mřížky, který se vypočítá podle (3.3).



Obrázek 3.8: Porovnání citlivostí ve vzduchu.



Obrázek 3.9: Porovnání normalizovaných citlivostí ve vzduchu s budící mřížkou.

Tabulka 3.2: Hodnoty pro výpočet vstupního tlaku budící mřížky.

Parametr	Hodnota	Jednotka	Popis
ε_0	8,854	$\text{pF} \cdot \text{m}^{-1}$	permitivita vakua
U_0	100	V	polarizační napětí mikrofonu
U_G	230	V	polarizační napětí mřížky
u	9	V	napětí střídavého signálu
d	0,4	mm	tloušťka mezi membránou a mřížkou

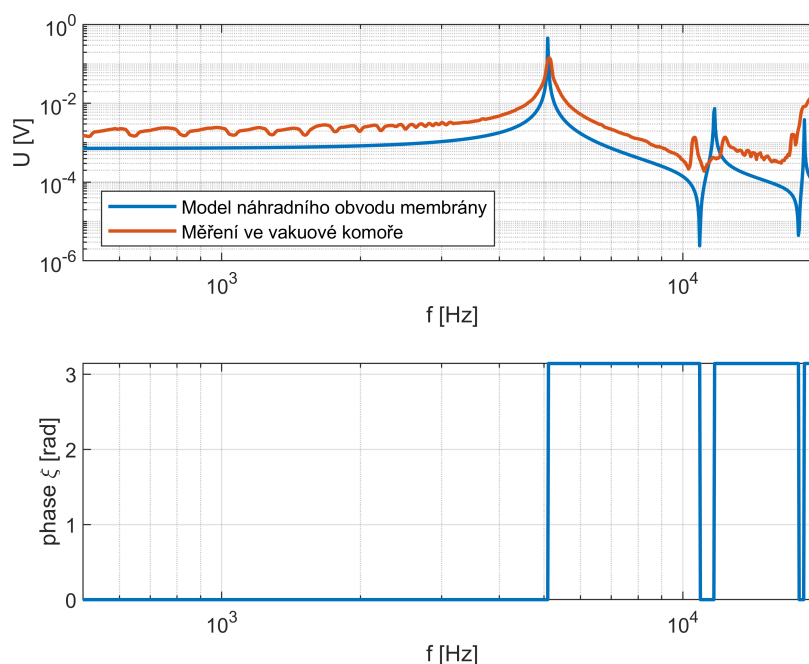
V posledním grafu 3.10 se porovnává měření ve vakuové komoře s modelem náhradního obvodu membrány, protože ve vakuu se z náhradního obvodu 1.3 uplatní pouze tato část.

3.2.5 Výpočet mechanického napětí membrány

Hlavním důvodem, proč se měří výstupní charakteristika mikrofonu ve vakuu je, že se z ní dá určit rezonanční frekvence mikrofonu f_{res} , která je poslední neznámou k dopočítání mechanického napětí membrány T . Z rovnice (1.11) pokud jde jmenovatel $J_0(k_M R)$ k nule a vyjádří se ze vztahu mechanické napětí membrány, pak je rovno [5]

$$T = m_1 \left(\frac{2\pi f_{res} R}{j_1} \right)^2, \quad (3.4)$$

Z obrázku 3.10 jsem určil hodnotu první rezonanční frekvence $f_{res} = 5132 \text{ Hz}$



Obrázek 3.10: Porovnání výstupního napětí mikrofonu ve vakuu.

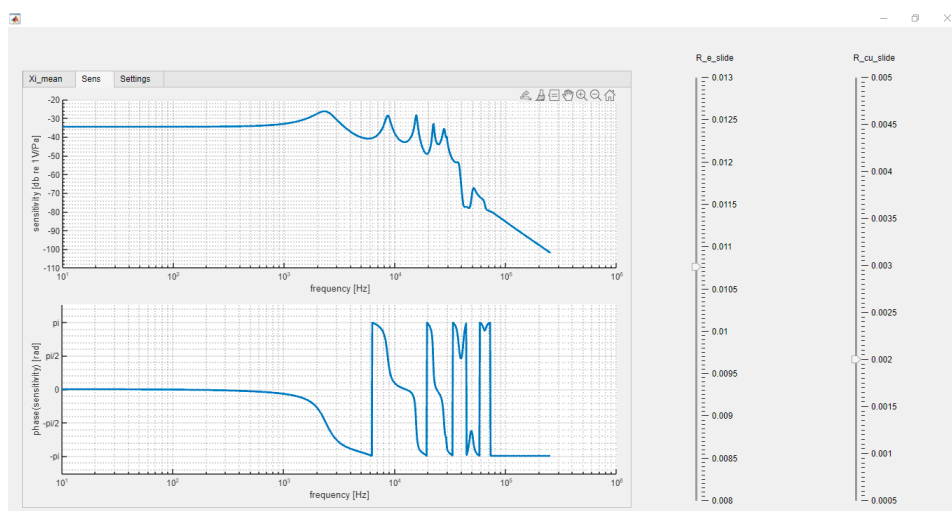
a tedy po dosazení do vzorce (3.4) jsem dostal mechanické napětí membrány $T = 1214 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.

3.3 Návrh mikrofonu s menší pevnou elektrodou než je membrána

3.3.1 Návrh parametrů elektrody

V sekci 2.2 byl uveden analytický [9], který byl klíčový v navrhování poloměrů R_{Cu} a R_e . Model pro velké množství hodnot poloměrů přestal být přehledný, a tak jsem ho implementoval do App Designeru v prostředí Matlab. Za pomoci dvou posuvníků (pro každý poloměr jeden) jsem si místo několika přes sebe nepřehledných křivek mohl zobrazit jednu. Ukázka App Designeru je na obrázku 3.11.

Hodnoty na obrázku 3.11 jsou ty, které se zároveň dále použili v návrhu DPS. Poloměr $R_e = 10,8 \text{ mm}$, což je určeno původním poloměrem pevné elektrody prototypu, od kterého se odečte šířka drážky pro frézování otvorů v pevné elektrodě. K tomuto víceméně předem danému poloměru R_e jsem zvolil dva poloměry pokovení R_{Cu} a to 2 a 5 mm. Dvě hodnoty jsem zvolil, abych pozoroval, jestli se při měření bude rozpoznatelně měnit zvlnění mezi rezonancemi mikrofonu.



Obrázek 3.11: App Designer v prostředí Matlab k návrhu poloměrů R_{Cu} a R_e .

3.3.2 Návrh DPS

Od vedoucího práce jsem obdržel návrh pevné elektrody prototypu 3.12a, který jsem optimalizoval pro účely menší pevné elektrody 3.12b. Bylo potřeba použít menší pouzdra součástek, aby se na menší elektrodu vše vešlo. Pracoval jsem v programu Altium Designer, ze kterého jsou i následující obrázky 3.12. Mezi hlavní součástky na zadní straně pevné elektrody patří regulátor napětí, invertor a zesilovač.

3.3.3 Regulátor napětí MIC5231-5.0YM5-TR

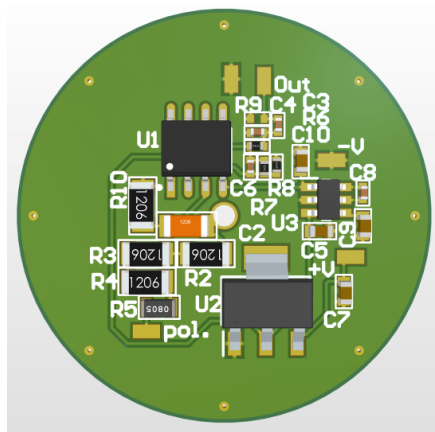
Tento Regulátor [16] v zapojení slouží ke snížení napětí z 9V na 5V, v mém případě konkrétně snižuje napájecí napětí z baterie. Je v pouzdru SOT-23-5 a jedná se tedy o menší pouzdro, než které bylo použito v prototypu. Ve schématu 3.13 je pod označením U2 (celé schéma návrhu menší elektrody, viz A.1).

3.3.4 Invertor napětí LM2776DBVT

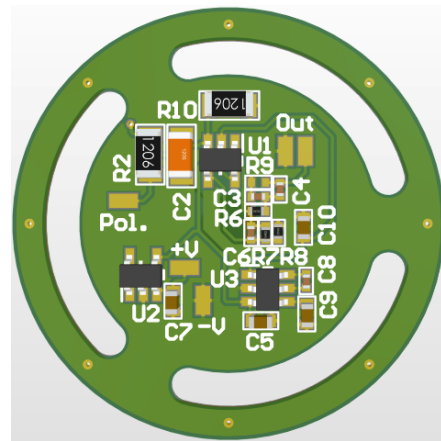
Invertor napětí [17] je v zapojení z důvodu nutnosti symetrického napájení, -5V a +5V, pro operační zesilovač 3.3.5. Jedná se o součástku, kterou jsem v návrhu měnit nemusel, jelikož už byla v malém pouzdře SOT-23-6. Ve schématu 3.13 je označen U3.

3.3.5 Audio operační zesilovač OPA1655DBVR

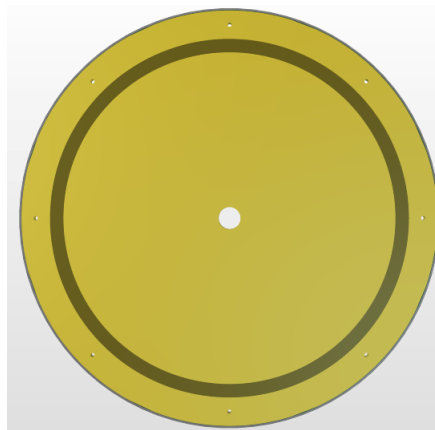
Audio Operační zesilovač [18] slouží v zapojení jako předzesilovač mikrofону. Jeho vstup je záměrně, co nejlépe situovaný k pokovení pevné elektrody, protože při delší cestě by se mohl slabý výstupní signál mikrofону zkraslit. Schéma 3.14 je zapojení operačního zesilovače.



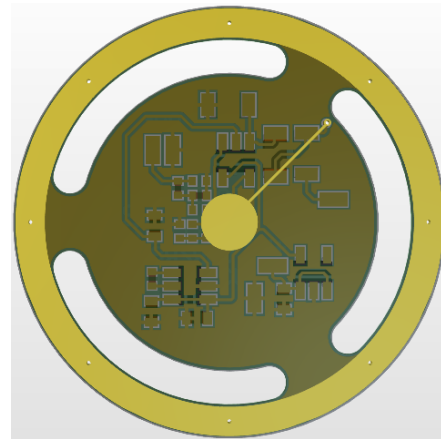
(a) : Pevná elektroda prototypu.



(b) : Pevná elektroda návrhu.

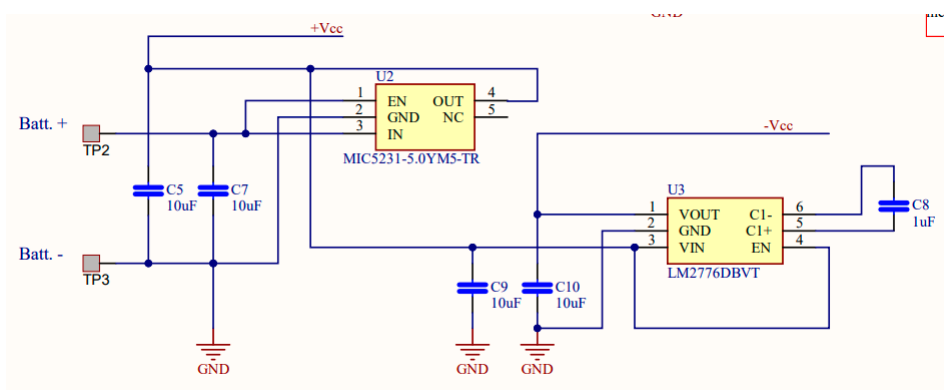


(c) : Pokovená strana prototypu.

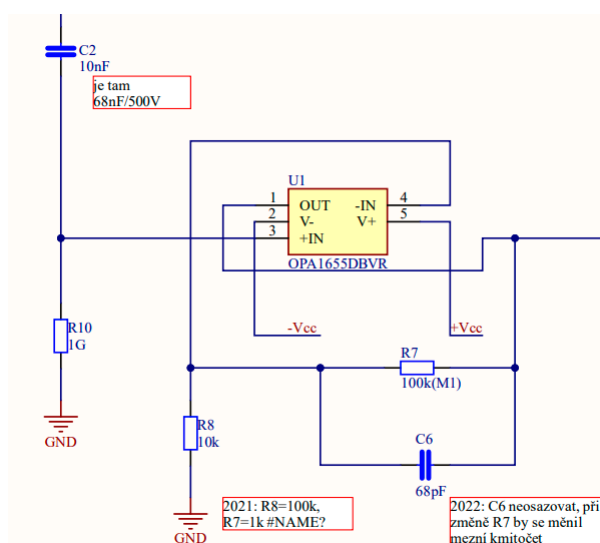


(d) : Pokovená strana návrhu.

Obrázek 3.12: Porovnání pevné elektrody prototypu a návrhu.



Obrázek 3.13: Schéma regulátoru napětí [16] a invertoru napětí [17].



Obrázek 3.14: Schéma zapojení audio operačního zesilovače [18].

3.4 Měření mikrofonu s menší pevnou elektrodou než je membrána

3.4.1 Měření menší elektrody ve vzduchu s referenčním mikrofonem

Měření nového návrhu menší elektrody, než je membrána mikrofonu se povedlo pouze pro metodu měření s referenčním mikrofonem více v sekci 3.4.3. Schéma i postup, byly zmíněny v sekci 3.2.1. Polarizační napětí mikrofonu U_0 bylo při měření 60 V.

3.4.2 Porovnání se simulací

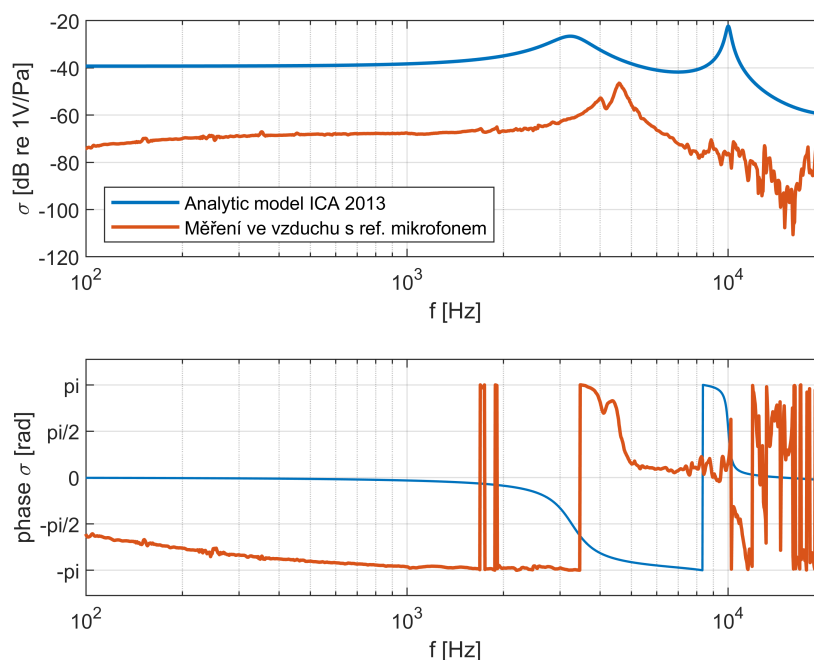
Měření ve vzduchu s referenčním mikrofonem v porovnání s analytickým modelem [9] je znázorněno na obrázku 3.15.

Změřená křivka má dva vrcholky blízko u sebe, nejspíše se nejedná o první a druhou rezonanční frekvenci, které jsou naopak vidět dále od sebe na křivce analytického modelu. Vrcholky jsou nejspíše módy pro elipsovitou membránu, která mohla vzniknout během měření za předpokladu, že se 3D tisk při dotahování membrány lehce deformoval.

3.4.3 Problémy při měření

Jak vyplývá z předchozích sekcí, naměřit se mi povedla pouze citlivost mikrofonu ve vzduchu s referenčním mikrofonem. Během měření se vyskytlo hned několik problémů.

Po obdržení součástek a navržených desek pevných elektrod, jsem začal osazovat. Po důkladné kontrole, zda někde náhodou nejsou spojené piny



Obrázek 3.15: Citlivost ve vzduchu.

součástek, které nemají být propojeny, jsem chtěl otestovat mikrofon. Z důvodu, že jsem používal jednu vytištěnou konstrukci, tak jsem musel rozebrat prototyp, na kterém jsem měřil do té doby. Při rozebrání se projevila opotřebenost membrány, která i při menším natažení praskla. Membránu jsem vyměnil a zapojil jsem mikrofon k otestování. Žádný výstup z mikrofonu nevycházel, a proto přišlo na řadu proměřování voltmetrem. Příčina problému byla taková, že invertor na výstupu neměl -5V, ale 0,5V. Po všech možných kontrolách i výměně invertoru za nový byl výsledek stále stejný. Doporučení na různých internetových fórech fungovalo nepatrnou změnou napětí. O vadný kus se nejednalo a všechny zbylé součástky byly v pořádku. Po všech možných úvahách jsme s vedoucím práce rozhodli pro externí zdroj symetrického napájení.

Dalším problémem bylo, jak docílit dostatečně velkého mechanického napětí membrány, aby platila kvazistatická stabilita měniče. Pro lepší utahování mi vedoucí práce vytiskl na 3D tiskárně dotahovací klíč, držák a podložky pod pevnou elektrodu znázorněny na obrázku 3.18. Výrazně to zlepšilo dotahování, ale druhý extrém byl, že pro málo dotažený závit mikrofonu, membrána začala praskat. Výměna tištěných "spacerů", které určují tloušťku mezery mezi elektrodami, také nepomohla. Je možné, že samotná konstrukce s každým dotahováním měnila svůj tvar.

Řešení těchto problémů a i ten s dotahováním membrány, zabralo hodně času. Horší, ale je, že nebyl lepší způsob, než zkusit dotahovat dokud to vydrží membrána. S přibývajícimi pokusy a vynaložení větší síly, byl výsledek ještě horší.



Obrázek 3.16: Tištěné podložky "spacery" pro lepší dotažování.



Obrázek 3.17: Tištěný utahovací držák a klíč.

Obrázek 3.18: Nástroje na dotažení membrány mikrofonu.



Závěr

V této práci se mi povedlo seznámit se s teorií elektrostatického mikrofonu a aplikovat znalost do modelu náhradního obvodu mikrofonu. Podařilo se mi změřit výstupní charakteristiku prototypu ve vakuu, z ní určit rezonanční frekvenci a dopočítat mechanické napětí membrány.

Dokázal jsem aplikovat analytický model pro návrh a realizaci pevné elektrody menší než je membrána mikrofonu. Bohužel se mi pro komplikace spojené s nedostatečným dotažením membrány povedlo změřit výstupní charakteristiky pouze při měření ve vzduchu s referenčním mikrofonem navrženého mikrofonu.

V budoucí práci by bylo dobré se zaměřit na vylepšení způsobu uchycení a napínání membrány.



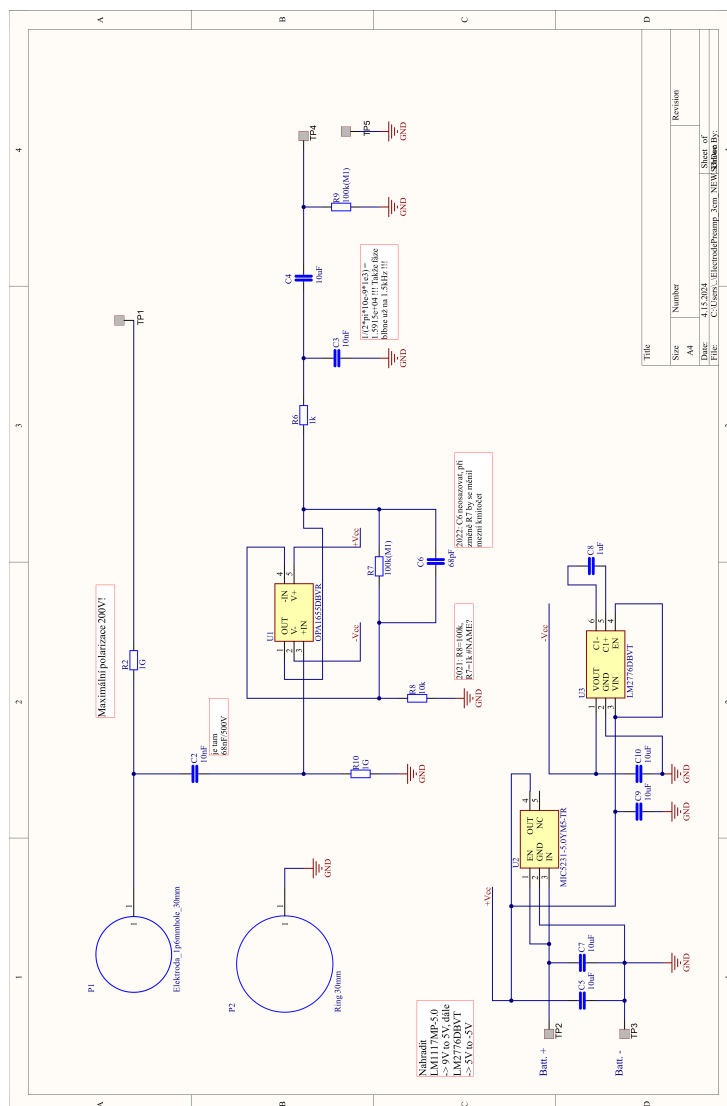
Literatura

- [1] Honzík P, Podkovskiy A, Durand S, Joly N, Bruneau M. *Analytical and numerical modeling of an axisymmetrical electrostatic transducer with interior geometrical discontinuity*. J Acoust Soc Am. 2013 Nov;134(5):3573-9. doi: 10.1121/1.4824342. PMID: 24180768.
- [2] Jiříček O. 2002. *Úvod do akustiky*. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-01-02460-1.
- [3] Novak A, Honzík P. *Measurement of nonlinear distortion of MEMS microphones*. In: Applied Acoustics, 2021, vol. 175, s. 107802. ISSN 0003-682X. DOI 10.1016/j.apacoust.2020.107802
- [4] Beranek L L, Mellow V T, *Acoustics: Sound Fields and Transducers*, Elsevier, UK, USA, 2012.
- [5] Abramova K, Honzík P. (2017). *Experimental Estimation of Unknown Parameters of Equivalent Circuits of Low-cost Electret Microphones*. Akustické listy. 23. 9-17.
- [6] Škvor Z, *Elektroakustika a akustika*. Praha: vydavatelství ČVUT, 2012. ISBN 978-80-01 05034-7
- [7] Škvor Z, *On the Acoustical Resistance Due to Viscous Losses in the Air Gap of Electrostatic Transducers*, Acustica, 19, 1967, 295–299.
- [8] Bruneau M, Scelo T, *Fundamentals of Acoustics*, ISTE, London, 2006.
- [9] Podkovskiy A, Honzík P, Durand S, Joly N, Bruneau M. *Miniaturized electrostatic receiver with small-sized backing electrode*. Proc. Mtgs. Acoust. 2 June 2013; 19 (1): 030047. <https://doi.org/10.1121/1.4799310>
- [10] Gazda, A. *Condenser Microphone with Sigma-Delta Conversion*. Praha, 2023. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Elektrotechnická fakulta. Vedoucí práce Ing. Petr Honzík, Ph.D.
- [11] Ringsmuth, D. *Kondenzátorový mikrofon s dělenou pevnou elektrodou*. Praha, 2023. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Elektrotechnická fakulta. Vedoucí práce Ing. Petr Honzík, Ph.D.

- [12] Brüel & Kjær [online katalogový list]. *Product data*. ©2008 [cit. 22.5.2024]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2210.ashx>
- [13] Brüel & Kjær [online katalogový list]. *System data*. ©2016 [cit. 23.5.2024]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bu3080.ashx>
- [14] ČSN EN 61094-6. *Měřicí mikrofony - Část 6: Elektrostatické kalibrátory pro určení kmitočtové charakteristiky*. Praha: Český normalizační institut, 2005, 28 stran. Třídící znak 368880.
- [15] Plaček, J. *Teoretický model elektrostatického mikrofonu s nelinearitou*. Praha, 2024. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Elektrotechnická fakulta. Vedoucí práce Ing. Petr Honzík, Ph.D.
- [16] Microchip [online katalogový list]. *MIC5231*. ©2008 [cit. 23.5.2024]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/mic5231.pdf>
- [17] Texas Instruments [online katalogový list]. *LM2776 Switched Capacitor Inverter*. ©2017 [cit. 23.5.2024]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2776.pdf>
- [18] Texas Instruments [online katalogový list]. *OPA165x Ultra-Low-Noise, Low-Distortion, FET-Input, Burr-Brown™ Audio Operational Amplifiers*. ©2022 [cit. 23.5.2024]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa1655.pdf>

Příloha A

Schéma



Obrázek A.1: Schéma zapojení pevné elektrody menší, než je membrána.

Příloha B

Seznam datových příloh

Seznam datových příloh z projektů z prostředí Altium Designer a Matlab.

Tabulka B.1: Seznam datových příloh v Altium Designer.

Složka	Obsah
ElstatTransd_3cm_1p6hole_NEW - kopie	návrh menší elektrody
ElstatTransd_3cm_1p6hole_NEW	prototyp

Tabulka B.2: Seznam datových příloh v Matlabu

Popis	Soubor
Namerene_hodnoty	G2,2(f) Jan 19, 2024 13-35-44
	H1_2,1(f) Apr 30, 2024 16-51-22
	H1_2,1(f) Dec 15, 2023 12-01-46
	H1_2,1(f) Jan 12, 2024 11-36-20
	H1_2,1(f) Jan 19, 2024 11-55-09
	H1_2,1(f) Jan 19, 2024 12-02-34
	H1_2,1(f) Jan 19, 2024 13-35-47
funkce naměřených hodnot s menší elektrodou	func_mereni_mensi_elektroda
program s porovnáním měření	měření menší elektroda
App Designer v matlabu pro poloměry R_{Cu} a R_e	comp1
	func_mereni_mensi_elektroda
	ICA2013model_Zback
	Moje_hodnoty_Model_BK4939
	Rcu_ICA2013model_Zback
	Rcu_Moje_hodnoty_Model_BK4939
Model_Placek	besselzero
	funcVychylka_Elek_uprostred
	importfile
	mereni_vzduch
	normalizovana_citlivost
	struve
	Vychylka_Elek_uprostred
Porovnani	func_mereni_ref_mikrofon_60V
	func_mereni_ve_vakuu
	porovnani_prumerna_vychylka
	porovnani_ref_mikrofon
Vliv_parametru_na_citlivost	citlivost_hg
	citlivost_T
	citlivost_Vc
	vice_der_v_elektrode
teoreticky_uvod	